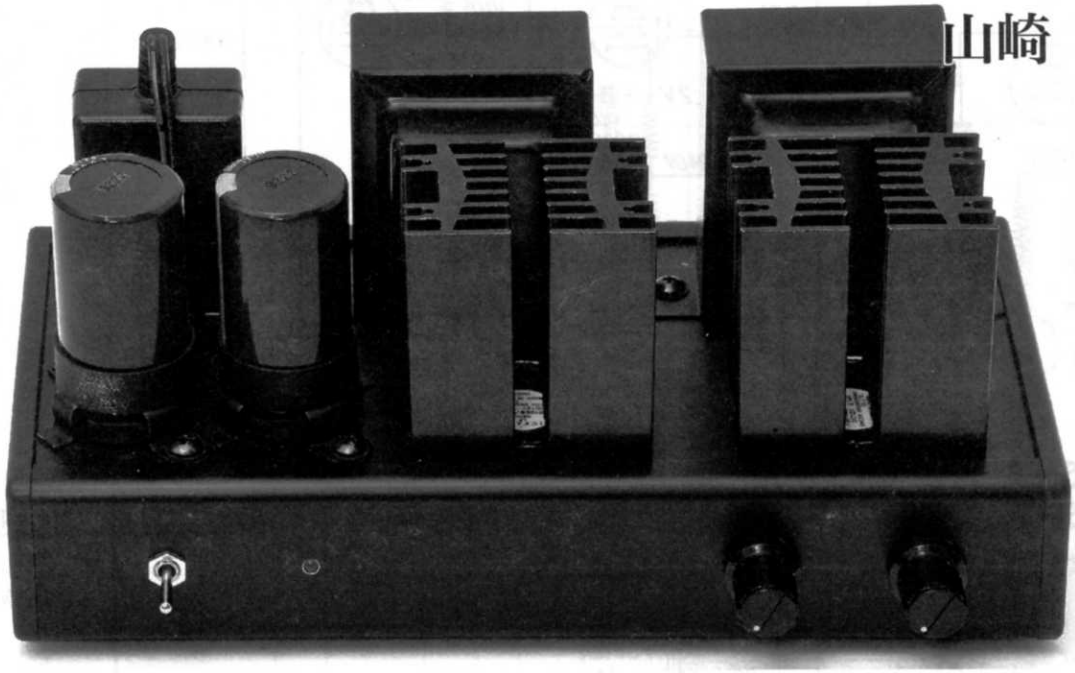
ソース・フォロワ駆動トランス付で5Wの出力

山崎 浩



MOS FETプッシュプル定電力アンプの製作

本アンプの狙い

通常，出力トランスはシングル，プッシュプルによらずカソード接地で駆動され，その巻線インダクタンス（および抵抗成分）と線間容量がアンプの低域，高域特性を制約します．広帯域化に有利な出力インピーダンス（内部抵抗）の低い真空管は概して直線性が悪く，さらなる高性能化には手詰まり感があります．

出力トランスをカソード・フォロワで駆動すれば出力トランスの弱点をカバーできそうですが，ヒータを具える真空管カソード・フォロワは制約が多く，製作例はわずかです（**第1図**）[*1]．本アンプはヒータおよびスクリーン・グリッドのない真空管（5極管）に相当する縦形パワーMOS-FETのソース・フォロワ[*2]が出力トランスを強力に駆動します．

先に製作した定電力アンプにおいて，負荷への出力電圧と出力電流を検出負帰還する効果を確認しました．本アンプにも適用します．長いタイトル（特徴を示す最短の表現）の本アンプ製作の狙いは以下の通りです．

1. パワーMOSFETのソース・フォロワで出力トランスを駆動
2. 小容量縦形MOSFETのSRPPで出力段パワーMOSFETを駆動
3. 電源はライン・オペレート
4. ライン・オペレートに不可欠の入力トランスをオペアンプで駆動し広帯域化
5. 出力トランス2次側からの負帰還で定電力動作
6. 無ひずみ最大出力5W，最小ひずみ率0.1%以下が目標

[*1] 1953年1月号，田丸一彦氏の「プレート・フォロワ型25L6ppアンプ」の復刻版が2009年2月号に掲載されました．最近では2012年1月号に塩田春樹氏による6EZ5の製作例があります．

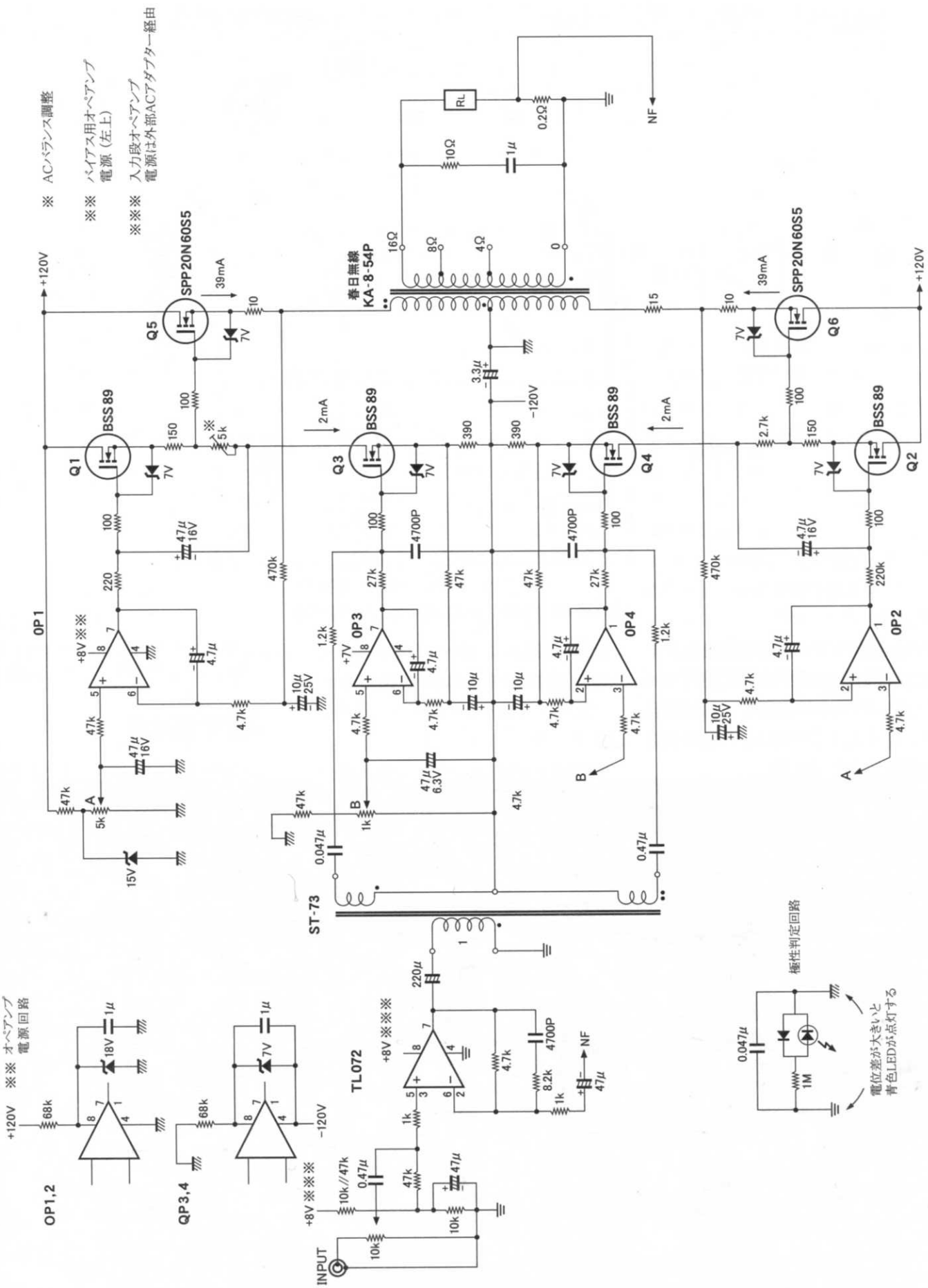
[*2] パワーMOSFETのソース・フォロワは真空管のカソード・フォロワに相当します．

増幅部の構成

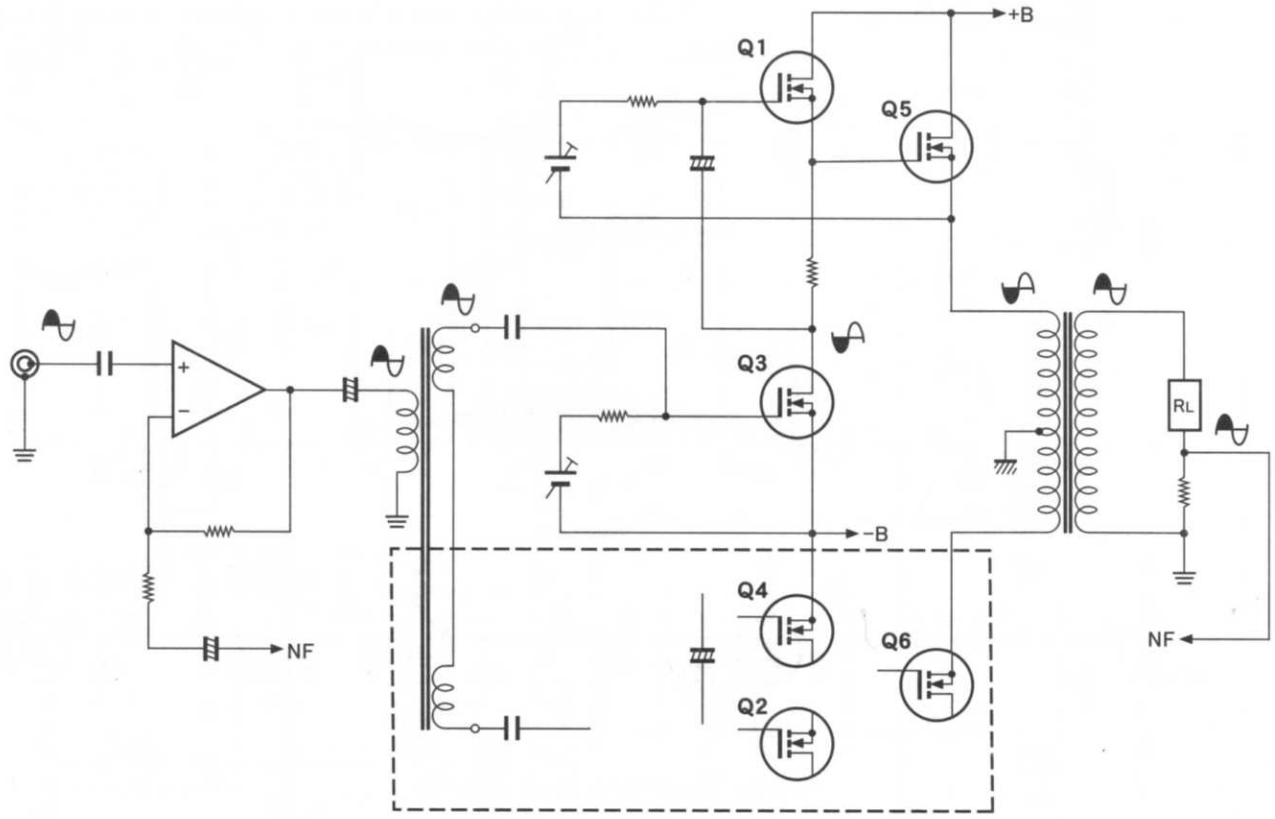
第2図に増幅部の全回路を示します．部品点数の多さに，我ながらうんざりします（**写真1**）．ただし，密集する中央4個（部品数は片ch2個）のオペアンプはMOSFETのゲートバイアス用で，個別のトリマーと等価です．

増幅部のレイアウト，上部2個の空冷ファンは使用しない

出力トランスの1次側を駆動するのは，シーメンス（現インフィニオン）社パワーMOSFET SPP20N60S5によるソース・フォロワです．出力トランスは春日無線の10Wプッシュプル用KA-8-54Pで，先に製作した25EH5プッシュプル（2011年7月号，2013年5月号），50BM8プッシュプル（2011年8月号）にも用いました．低インピーダンスのソース・フォロワ（定電圧）駆動で低域を拡大


※ ACバランス調整
※※ バイアス用オペアンプ 電源（左上）
※※※ 入力段オペアンプ 電源は外部ACアダプター経由
+120V
SPP20N60S5
Q5
39mA
春日無線 KA-8-54P
RL
0.2Ω
NF
16Ω
8Ω
4Ω
0
10Ω
1μ
BSS 89
Q1
Q3
Q4
Q6
Q2
2mA
-120V
3.3μ
7V
150
100
※ 5k
390
2.7k
0P1
0P3
0P4
0P2
+8V ※※
4.7μ
47μ 16V
10μ 25V
470k
4700P
27k
47k
1.2k
220
4.7k
47k 16V
5k
15V
A
B
1k
0.047μ
47μ 6.3V
0.47μ
ST-73
220μ
TL072
+8V ※※※
8.2k
1M
極性判定回路
電位差が大きいと
青色LEDが点灯する
※※※ オペアンプ 電源回路
OP1,2
QP3,4
68k
18V
-120V
10k//47k
10k
INPUT

〈第２図〉本機の増幅回路



プッシュプルの片側を点線内に省略

〈第3図〉信号経路に着目し簡略化した増幅回路

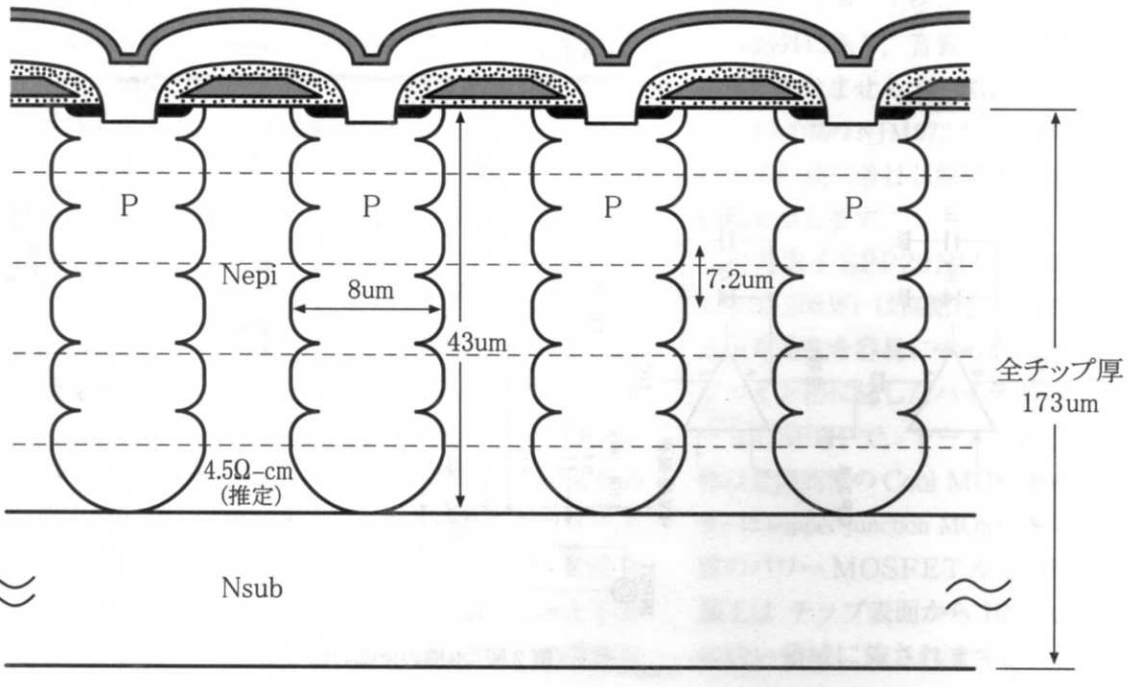
100μmもの深い領域を微細加工するCool MOSの製造には低耐圧(200V以下)パワーMOSFETにおける低オン抵抗化とは比較にならない手間が掛かります(**第4図**).

出力端に付加した0.2Ωで検出した負荷電流信号を入力部オペアンプに負帰還し，スピーカのインピーダンス変動にかかわらず入力電圧信号に比例する電力をスピーカに供給します.

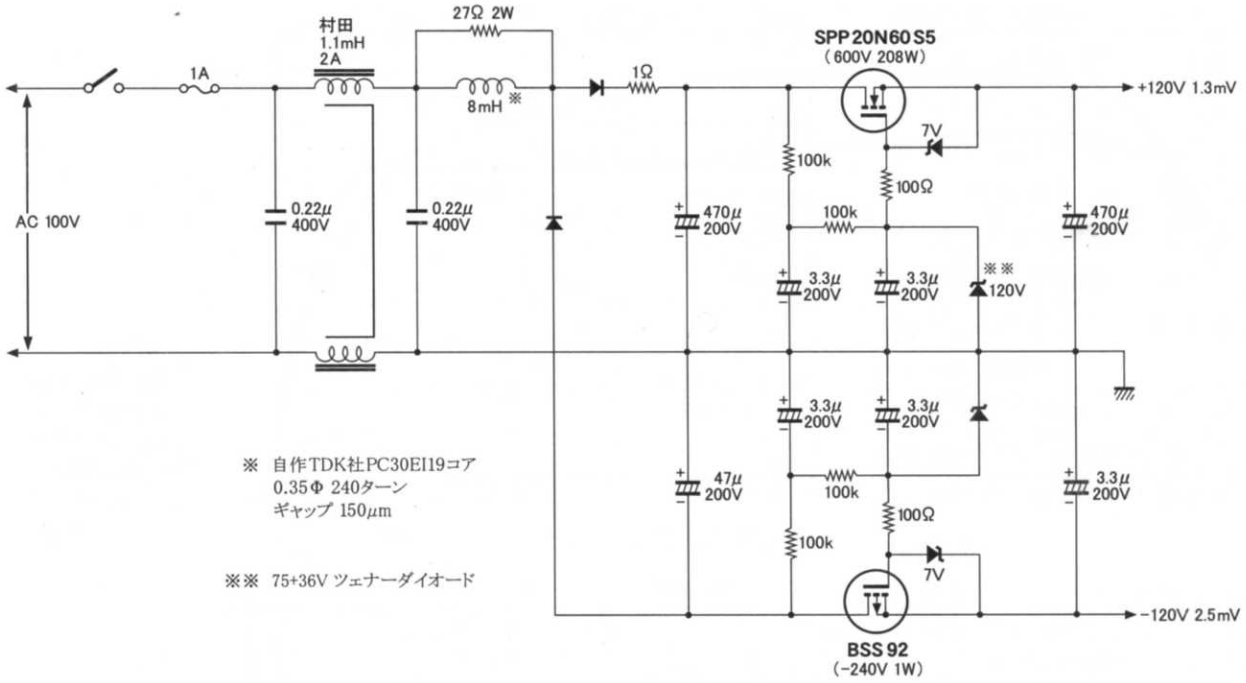
*3 出力トランス出力トランス1次巻線P1−B間，P2−B間の直流抵抗は15Ωの違いがありましたが，インダクタンスの実測値はそれぞれ120Hzにて30.2H，30Hです．通常，巻始めを示す黒丸がP1側にあるのは誤表記か？

SRPP駆動段

出力段パワーMOSFET SPP20N60S5は入力容量が3000pFと真空管の2桁以上で，強力な駆動段が



〈第4図〉
シーメンス社
Cool MOSの断面構造



〈第6図〉本機の電源回路

入力段はオペアンプ

ライン・オペレートの場合，プリアンプのアースラインから絶縁するための入力トランスが不可欠です．広帯域化を目指し，出力トランスを低インピーダンス駆動する本アンプにおいて，入力トランスが帯域巾を狭めてしまうのはナンセンスです．これまで頻繁に用いてきたサンスイST-17Aを高域特性の良いST-73Aに変更し，トレードオフで劣化する低域特性はオペアンプNJM072に内蔵されるエミッタ・フォロワ駆動で補います[*5]．ラインオペレートの入力トランスの2次側から出力トランスの1次側まではプッシュプル上下が対称に動作します．

出力端の0.2Ωで検出した負荷電流信号を，入力部オペアンプ出力端から4.7kΩおよび8.2kΩ+4700pFと1kΩで構成する電圧負帰還系の基準電位側に加えると定電力アンプになります．8.2kΩ+4700pFがない場合，出力端からの負帰還で42kHzを中心に5dBのピークを生じます．負荷に供給する出力電圧と出力電流を検出乗算し負帰還する方式の定電力アンプについては，本誌2013年2，3月号の拙稿を参照願います．ただし，本アンプの場合，負荷端出力電圧の代わりにオペアンプの出力電圧を用います．

ライン・オペレートにおいて磁気シールドのない入力トランスは電源ハムを拾い易く，レイアウトの最適化には手間が掛かります．本アンプではレイアウトによる差は僅かで，簡単に済んだのは，ST-73Aの1次巻線が少ないこと，および出力が5W程度と小さいためでしょう．

*4 豆粒ほどのBSS89のオン抵抗（の低さ）に匹敵する真空管は存在しません．

*5 入力トランスがST-17Aの場合，オペアンプを介さずプリアンプに接続できますが，巻線比（1.6：0.5×2）に従い出力は入力に対し10dB小さくなり，高域は約25kHzから下がり始めます．

出力素子の放熱

たかだか5W×2の本アンプの出力素子SPP20N60S5（パワーMOSFET）のドレイン損失PD=208Wは，MT管50BM8の30倍，大形真空管UV211の3倍弱です．ただし，パワーMOSFETのケース（≒ネジ止め部分）温度Tcを25℃に維持することが前提で，Tcが150℃になるとPDは0です．よって，周囲温度に影響され易いパワーMOSFETには放熱器が不可欠です．通常，放熱器を使用しない真空管とは大きく異なります．

当初から，出力素子の放熱器込みの容積を比較試聴する50BM8と同等にすべくデザインしました．形状が近い手持ちの放熱器35×20×50mm2の熱抵抗は9℃/Wで，SPP20N60S5の損失を120V×39mA=4.68Wとすれば，放熱器の温度は周囲温度より42.1℃高く，接合温度はさらに12℃高くなります（よって，放熱器周囲の許容上限温度は約95℃）．放熱器温度上昇実測値Δ32℃が計算値より10℃も抑制されるのは，真空管に似せ林立させた放熱器近傍に生ずる対流の効果でしょう．

パワーMOSFETの温度特性が負であることを理由に，バイポーラ・トランジスタより熱的に安定と誤解する回路設計者はプロ，アマを問わず少なくありません．熱的に安定な

	本アンプ	50BM8 プッシュプル	801A 並列シングル
電圧ゲイン	28.0db	29.8db	28.1dB
周波数帯域幅	6.9Hz ～ 54kHz	16.3Hz ～ 29.8kHz	10Hz ～ 30kHz
無ひずみ最大出力	4.5W	10W	12W
最小ひずみ率	0.05%	0.17%	0.085%
出力インピーダンス*9	10.6−15−5.7Ω	52−100−38Ω	3.4−4−4Ω
定電力範囲(± 10%)	5.5 ～ 35Ω		
重量サイズ	1.8kg20×12×9.5cm	1.8kg20×12×9.5cm	24.5kg45×30.5×20cm
ピアノ	華やか，バランス良	同左前に出る，明るい	同左
ドラムセット	歯切れ良	同左	同左
フルート	生々しい	同左	同左
トランペット	輝かしい	同左	同左
弦	自然	同左	同左
女性 ボーカル	自然	同左	同左

*9 20Hz ～ 20kHz

〈第 2 表〉試聴結果

10% の出力電力範囲は 5.5 ～ 35Ω です．点線で示す無帰還時と比べると，負帰還の有効性は明らかです．

試聴と反省

出力トランスをパワー MOSFET のソース・フォロワで駆動する本定電力アンプを，私の基準アンプ武末数馬氏設計 801A 並列シングルのコピー（1996 年 2 月号），先に製作したライン・オペレートの 50BM8 プッシュプル形定電流アンプ（2011 年 10 月号），とによる比較試聴結果は表 2 の通りです．本アンプの無ひずみ最大出力が約 1/2 と小さ目ですが電気的特性は比較し得る範囲です．ソースは日本オーディオ協会製作の CD「IMPACT−2」，スピーカは '10 年 11 月 13 日の音の展覧会で使用した口径 8cm の SA/F80AMG（球形バスレフ BOX，2009 年 1 月号）を用いました．

出力インピーダンスが中位で負荷変動に応じて変化する定電力アンプ（本アンプ），小さ目で私の基準アンプ 801A 並列シングル，大きい定電流アンプ（50BM8）の回路方式，素子は全く異なるにもかかわらず音色はほとんど同じです．ピアノにおける違いもわずかで，**第 2 表**の表現は誇張しています．歯切れの良さを比較するドラムセットにおいてさえ，出力インピーダンスの違いが最小 801A 並列シングルの 3.4−4−4Ω，最大 50BM8 の 52−100−38Ω を聴き分けることはできませんでした．

本アンプの増幅部は半導体式としては例外的です．真空管式アンプに比べれば部品点数が多いものの，半導体式の例えば 2 段差動入力を具えた SEPP 回路と同等で，素子特性バラツキを許容し調整箇所が少ない本アンプの製作は容易です．

当初，SRPP 段のバイアス回路にオペアンプを予定していなかったため，プリント基板の混雑には私自身うんざりしています．未使用のファン・スペースに，改めてレイアウトし直したいところです．本アンプの電気的特性，音色は以下の設計における問題点を抱えつつも，評価に値しないほどではないと思います．重要パーツであるトランス類に完璧さを求めないこと，加えてライン・オペレート電源は武末数馬氏がご存命であればお叱りを受けることは必定です*10．武末氏に限らず識者から指摘されそうな本アンプの問題点は以下の通りです．

1. 本来，バンドパス・フィルタのトランスを信号経路に用いつつ，広帯域化を狙うのはナンセンス．
2. パワー MOSFET は電圧駆動素子であり，SRPP による定電流駆動は不適当．
3. 信号経路に音質を左右しそうなキーパーツとして L（トランス）カップリング，C カップリングが各々 2，7 個も存在する．
4. 信号経路にオペアンプを用いる．
5. ライン・オペレートは AC ラインノイズに影響されやすい．
6. 定電力アンプの有効性はオーディオ業界で認められていない．
7. シーメンス社製デバイスを多用し過ぎる（出力管 Ed よりは容易に入手できますが）．

*10 本誌1954年12月号(2013年10月号に復刻)に掲載される本誌における武末氏第 1 作「クロス・シャント回路のローコスト・Hi-Fi アンプ」を感慨深く読ませていただきました．ライン・オペレート・アンプにもかかわらず，入力部にトランスなどの絶縁要素がないために，信号源が AC ラインで基準電位が大きく揺れる可能性があります（設計ミスかも？）．